

Theoretical Studies on Magnetic Fields in Star-Forming Environments: Developing Observational Diagnostics from Filamentary Molecular Clouds to Cloud Cores

星形成環境における磁場推定に向けた理論的研究
—フィラメント分子雲から分子雲コアにわたる観測的診断法の提案—

吹原 瑤

星は分子雲というガスの塊が重力収縮することによって形成します。このとき、重力や乱流と並んで重要な役割を果たすのが「磁場」です。磁場は重力収縮を支えたり、ガスの動きに異方性を与えるため、星形成を理解するにはその強度や構造を知ることが欠かせません。しかし、宇宙空間に広がる磁場を直接測ることは容易ではありません。本博士論文では、分子雲から高密度コアへと至る星形成の異なるスケールにおいて、観測可能な量から磁場の性質を推定する新たな方法を理論的に検討しました。ここでは、そのうち分子雲コアにおける磁場強度推定についての研究をご紹介します。

近年の高感度観測によって、分子雲や分子雲コアにおいて、イオン分子と中性分子の速度差 (= ドリフト速度) が 100m/s 程度であることが報告されています。この速度差は、磁場の影響を直接受けるイオンと、そうでない中性粒子との間に生じる「両極性拡散」を起源とすると考えられます。両極性拡散の強さは、ガスの電離度や磁場強度に依存します。そしてガスの電離度は、宇宙線電離や気相再結合だけでなく、荷電粒子のダストの表面への吸着反応にも大きく左右されます。そのため、ガスの電離度及び両極性拡散抵抗値、さらにはドリフト速度決定において、ダストのサイズ分布が重要です。

そこで本研究では、降着と凝集によるダスト成長を含むガスの電離化学シミュレーションを行い、ドリフト速度を推定しました。その結果、分子雲コア環境において観測された 100m/s のドリフト速度を再現するには、200 μ G 程度の磁場強度と 10 μ m 程度まで成長したダストの存在の両方が必要であることがわかりました。これは、分子雲コアにおけるドリフト速度の観測が「磁場の強さ」と「ダストの成長」を同時に制約できる可能性を示しています。

本研究は、観測量を手がかりに見えない磁場を読み解く、新しい診断法の提案です。今後は、より現実的な 3次元シミュレーションへと発展させ、分子雲が高密度コアへと進化する中で磁場やダストがどのように進化していくのかを明らかにしていきたいと考えています。

博士課程修了までの9年間、本学で多くの先生方、学生の皆さま、職員の皆さまに支えていただきました。この場をお借りして心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

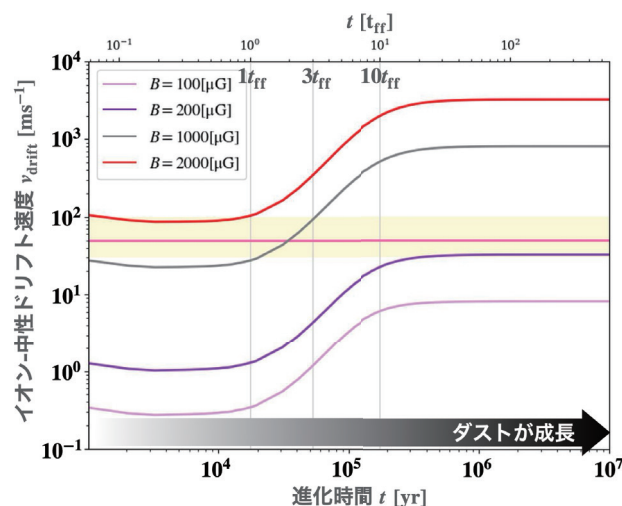


図1: 推定ドリフト速度進化の磁場強度依存性。横軸は進化時間を示し、ダストの成長に対応する。観測値の範囲を黄色で示す。

Disk evolution in low-mass protostellar systems probed by the 3D dynamics

低質量原始星系における3次元動力学から探る円盤進化過程

城戸 未宇

星は、高密度なガスの領域（高密度コア）が自己重力で収縮することによって誕生します。生まれたばかりの星（原始星）の周囲には、ガスと固体微粒子（ダスト）から構成される原始星円盤が付随しています。惑星はこの円盤内で形成されるため、惑星がどのように誕生するのかを理解するには、円盤の構造を詳しく調べることが重要です。

電波干渉計 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) が建設されたことによって、高感度・高解像度観測が可能となり、円盤構造に関する観測的理解は飛躍的に進展しました。特に、誕生から数百万年が経過した T Tauri 型星の円盤では、惑星の存在を示唆するリング・ギャップ構造が多数検出されてきました。一方で、誕生から数万年程度の若い原始星ではそのような構造は確認されておらず、ガスやダストに満たされた比較的なめらかな円盤が付随していることが明らかとなりました。これらの観測結果は、原始星から T Tauri 型星へ進化する間に、惑星形成が始まり、円盤の構造が大きく変化していることを示唆しています。したがって、惑星形成の初期条件を理解するためには、原始星段階における円盤進化の実態を明らかにすることが不可欠です。

原始星段階では、星と円盤は高密度コアに由来するガス（エンベロープ）に包まれており、そこから物質を取り込みながら成長しています。近年の原始星に対する高分解能観測では、円盤から細長く伸びた「ストリーマー」と呼ばれる構造が発見され始めました。ストリーマーは、円盤へ降着するガスやダストの流れを反映した構造です。従来の星形成モデルでは、球対称な高密度コアが収縮し、等方的に物質が降着すると考えられていました。しかし、ストリーマーは物質が非対称に降着していることを示し

ています。磁場や乱流を取り入れた数値シミュレーションでは、高密度コアの崩壊から星形成に至る過程の中で、ストリーマーのような細長い構造が複数形成され、これらが主な質量供給経路となることが報告されています。しかし、その役割についての観測的検証はほとんど行われていませんでした。そこで本研究では、ストリーマーによる質量降着を定量的に評価し、高密度コアとの比較を通じて、円盤への質量供給におけるストリーマーの寄与を明らかにすることを目的としました。

観測対象天体として、ストリーマーのような構造がすでに確認されている Class 0 原始星 IRAS 16544-1604 を選択しました。この天体は、比較的近傍に位置しているため、高分解能で観測することができます。また、孤立した領域の天体であるため、周囲の星形成活動の影響を受けにくく、星形成過程を調べるのに理想的な環境です。

質量推定には、電波干渉計 ALMA と電波単一望遠鏡 JCMT (James Clerk Maxwell Telescope) の観測データを用いました。ALMA は数千天文単位スケールの構造の解析に適しており、JCMT は数万天文単位スケールの広域構造を捉えることができます。そのため、ストリーマーを ALMA で (図 1)、高密度コアを JCMT で (図 2) 観測し、それぞれの質量を求めました。

その結果、ストリーマーの質量は高密度コアの質量の 10% 以下であることが分かりました。つまり、この天体において、ストリーマーは円盤への主要な供給源ではないことを明らかにしました。この結果は、ストリーマーが主な供給経路と報告されていたシミュレーションの結果とは異なります。一方で、ストリーマーが円盤と接触する領域では、降着衝撃

が発生していることを示唆する分子輝線を検出しました（図1）。降着衝撃によって局所的に温度や密度が上昇すると考えられるため、ストリーマーは質量供給量こそ限定的であるものの、円盤の構造に影響を与えている可能性があります。今後は追加観測を行い、ストリーマーが円盤に与える具体的な影響

を明らかにしたいと考えています。

最後に、大学入学から博士課程までの9年間、鹿児島大学の皆様には大変お世話になりました。ありがとうございました。

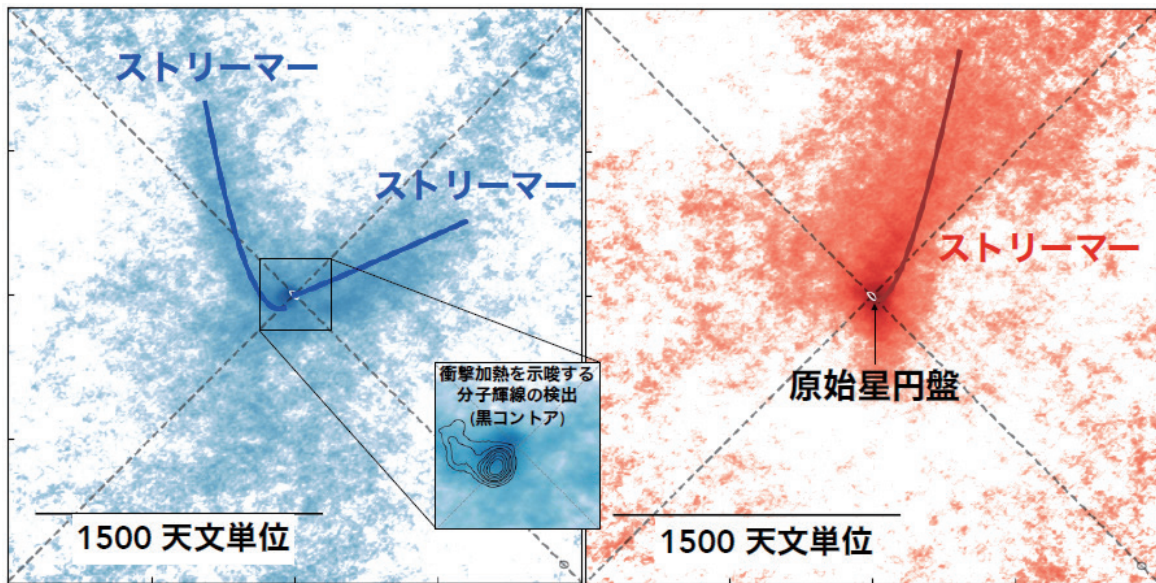


図1：ALMAで観測された $C^{18}O$ 分子輝線の青方偏移（左）と赤方偏移（右）の積分強度図。青方偏移では2本、赤方偏移では1本のストリーマーを発見した。円盤近傍では、ストリーマーに沿った分布を持つ衝撃加熱を示唆する SiO 分子輝線を検出した。

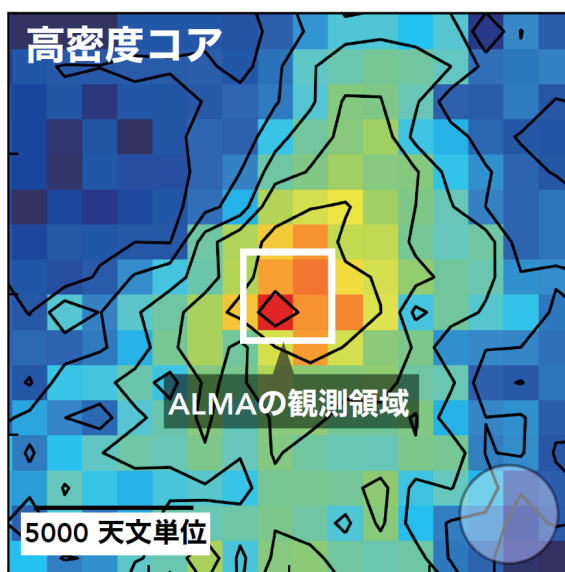


図2：JCMTで観測された $C^{18}O$ 分子輝線の積分強度図。南北に伸びた2万天文単位スケールの高密度コアを検出した。

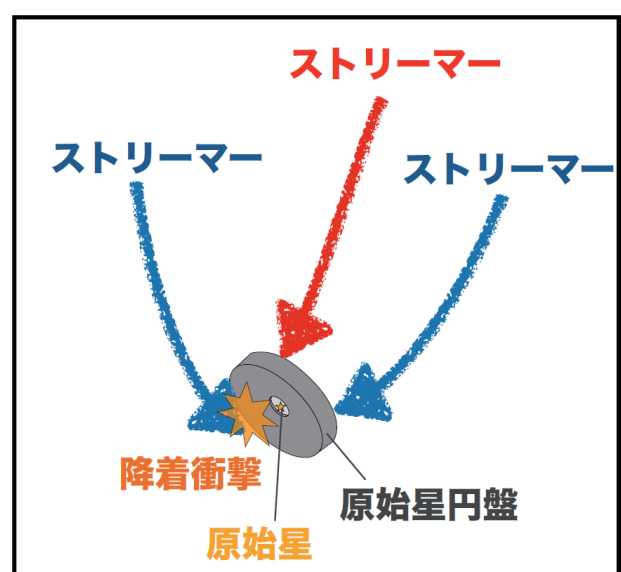


図3：ALMA観測から得られた対象天体 IRAS 16544-1604 のポンチ絵。

Study on the Long-term Evolution of Protoplanetary Disks Using One-dimensional Non ideal MHD Simulation

1次元非理想磁気流体力学シミュレーションによる原始惑星系円盤の長期進化の研究

小林 雄大

私たちが暮らす太陽系は、かつて若い太陽の周りにあった「原始惑星系円盤（ガスとダストの円盤）」から生まれました。では、その円盤はどのように形成され、どのように姿を変えながら現在の太陽系のような惑星系へと育てていくのでしょうか？近年、電波望遠鏡による高解像度観測が進み、若い Class 0/I 円盤とより進化した Class II 円盤の姿が見えるようになってきました。例えば、Class II 円盤ではリングやギャップといった多様なサブ構造が普遍的に見つかる一方、Class 0/I 円盤ではそれらが概ね見られず、比較的コンパクトで軸対称に近い姿が報告されています。

このような円盤の構造を理解するには、観測が示す「時間（円盤の年齢）」を理論側で追いかける必要があります。観測される円盤の年齢は、10万～100万年スケールに及びます。一方で、理論研究の主流な手法である3次元シミュレーションが得意としてきたのは、円盤形成・進化過程において重要な磁場の進化を詳細に追うことですが、計算できる時間スケールは典型的に1万年程度です。つまり、観測が見ている円盤の寿命と、シミュレーションが追える時間の間に大きなギャップがあるのです。

ここで素朴に思うのが、「粗い3次元シミュレーションを用いれば、もっと長い時間追えるのでは？」という疑問です。3次元シミュレーションの時間の刻み幅は最も厳しい領域（最少の空間スケール・最速の現象）に縛られます（CFL条件）。解像度を下げると数値拡散が増え、本質的な物理過程そのものが質的に変わります。したがって粗い3次元シミュレーションを用いても、物理的に信頼できる結果が得られない、という問題があります。

また、2次元シミュレーションも一見有望ですが、中心領域が時間刻みを支配するという根本は変わらず、さらに3次元的な不安定性や乱流など本質的な物理現象も扱えません。だからこそ、「何を知りたいのか」に狙いを定めた別のアプローチが必要になります。

そこで本研究では、円盤の長期進化を追うために、1次元の薄い円盤近似に基づく非理想磁気流体力学シミュレーションコードを開発しました。重要なのは、単に単純化するだけではなく、円盤形成・進化過程で本質的な役割を果たす磁場の進化も同時に追える点です。さらに、この枠組みにより、観測と直接比較しやすい「円盤半径・円盤質量・降着率・回転構造・磁束収支」といった本質的な量を10万～100万年スケールで一貫して評価できます。具体的な結果については研究ハイライト「惑星のゆりかご」を10万年追跡：原始惑星系円盤の長期進化を再現するシミュレーションコードの開発」をご参照ください。

最後に、2026年度からヤマハ発動機株式会社でエンジニアとして働くことになりました。学部生から博士課程までの10年間、鹿児島大学の皆様には大変お世話になりました。日頃より研究活動をサポートしてくださった皆様に、心より感謝申し上げます。